



Schwarzer, BMW Group, 22.11.2013

# MODEL UPDATING MIT OPTISLANG.

**ERMITTLUNG TRANSVERSAL ISOTROPER  
MATERIALEIGENSCHAFTEN VON IN HARZMATRIX  
EINGEBETTETEN KUPFERWICKLUNGEN IN E-MASCHINEN DURCH  
MODEL UPDATING.**

**BMW  
GROUP**



# AGENDA.



1. Kupferwicklungen in elektrischen Maschinen.
2. Experimentelle Modalanalyse von Kupferwicklungen.
3. Modellierungsansätze für Kupferwicklungen.
4. Automatisches „Model Updating“ zur Identifikation von Ersatzmaterialeigenschaften.

# KUPFERWICKLUNGEN IN ELEKTRISCHEN MASCHINEN.

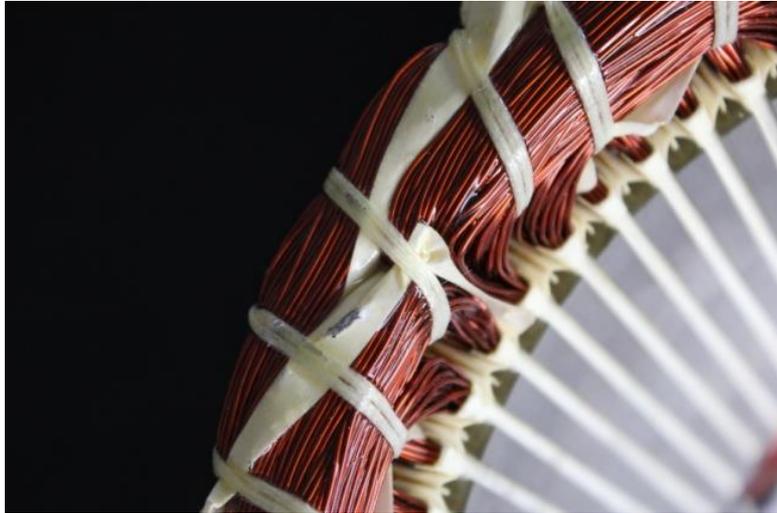


Abb. 1: Detailansicht eines exemplarischen Wickelkopfs in E-Maschinen.

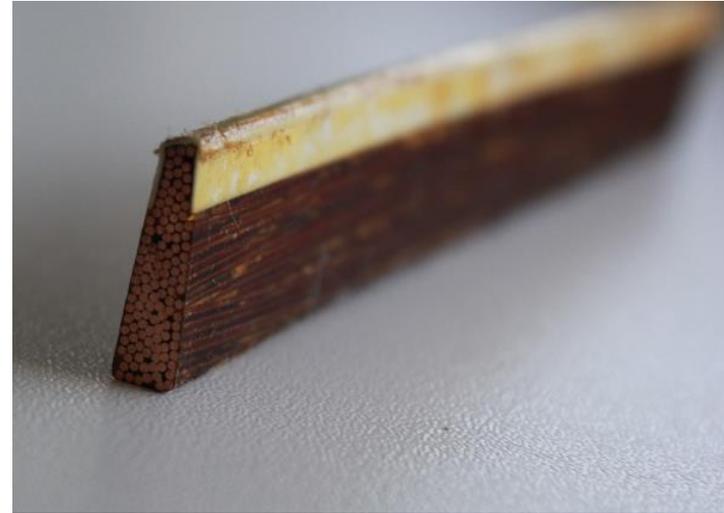


Abb. 2: Detailansicht der Kupferwicklungen aus einer E-Maschinenstatornut.

## Wesentliche Funktionen der Kupferwicklungen:

- Leiten des zum Antrieb der Maschine notwendigen **elektrischen Stroms**.
- **Abtransport** der durch Ohmsche Verluste entstehenden **Wärme**.
- Gewährleistung der **mechanischen Festigkeit** über die Lebensdauer der Maschine.
- **Elektrische Isolation** der Drähte untereinander und zwischen Drähten

# STRUKTUR DER KUPFERWICKLUNGEN.

## Kupferdrähte:

- Der Drahtkern besteht aus elektrisch hochleitfähigem Kupfer.
- Elektrische Isolation der Drähte mittels dünner Kunststofflackschicht.



Abb. 3: Bündel aus Kupferdrähten im angelieferten Zustand.

## Imprägniermaterial:

- Verwendung eines Polyesterimids zur elektrischen Isolation.
- Kunststoff → Frequenz-/Temperaturabhängige Materialeigenschaften.

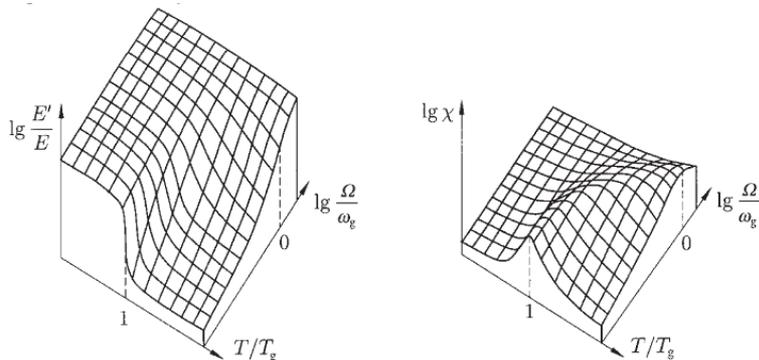


Abb. 5: Exemplarische Darstellung der Abhängigkeit des E-Moduls (links und der Dämpfung (rechts) von Temperatur und Frequenz der Belastung [VDI 3830 Blatt 2].



Abb. 4: Darstellung des Imprägnierungsprozesses.

# EXPERIMENTELLE MODALANALYSE.

## Versuchsaufbau:



Abb. 6: Kupferwicklungsprobe aus einer Statornut entnommen (konischer Querschnitt, Tiefe 3,6 bis 5,3 mm).

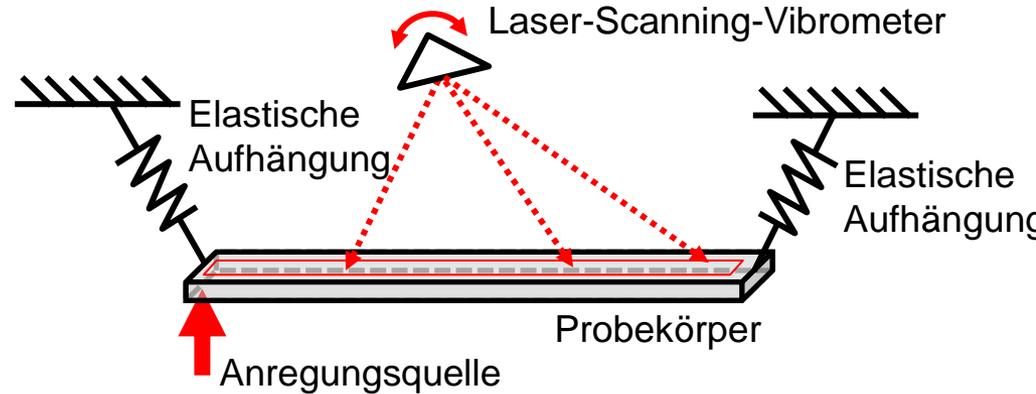


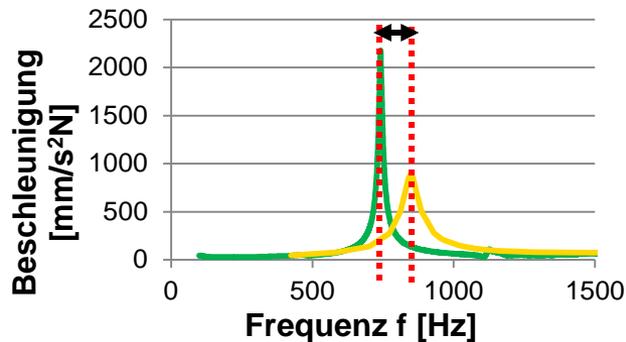
Abb. 7: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur experimentellen Modalanalyse.

## Ergebnisse:

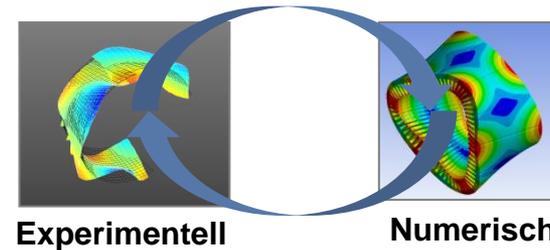
	1. Mode	2. Mode	3. Mode	4. Mode
Modale Schwingform				
Eigenfrequenz	745 Hz	1977 Hz	3481 Hz	5055 Hz

# VERGLEICHBARKEIT VON NUMERISCHER UND EXPERIMENTELLER MODALANALYSE.

Eigenfrequenzunterschied



MAC Matrix zum Vergleich der Schwingformen



$$f = a \sum_{i=1}^{nmodes} \left[ \frac{|f_i^{\text{exp}} - f_i^{\text{num}}|}{f_i^{\text{exp}}} \right] + b \sum_{i=1}^{nmodes} \left[ \text{MAC}(\phi_i^{\text{exp}}, \phi_i^{\text{num}}) - 1 \right]$$

[D. Ribeiro; Finite element model updating of a bowstring-arch railway bridge based on experimental modal parameters; Engineering Structures, Nr. 40, S. 413-435; 2012]

$$f = \sum_{i=1}^{nmodes} \text{MAC}(\phi_i^{\text{exp}}, \phi_i^{\text{num}}) \left( 1 - \frac{|f_i^{\text{exp}} - f_i^{\text{num}}|}{f_i^{\text{exp}}} \right)$$

# DETAILLIERTES MODELL FÜR KUPFERWICKLUNGEN.

## Materialdaten:

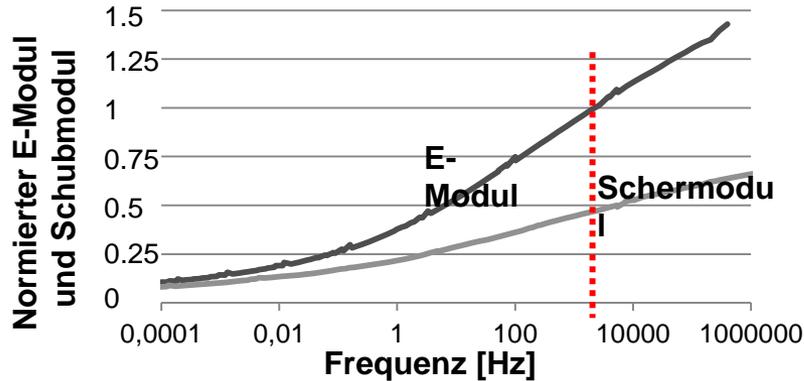


Abb. 8: Frequenzabhängige Materialparameter für das Imprägnierharz bei 20°C.

## Simulationsmodell:

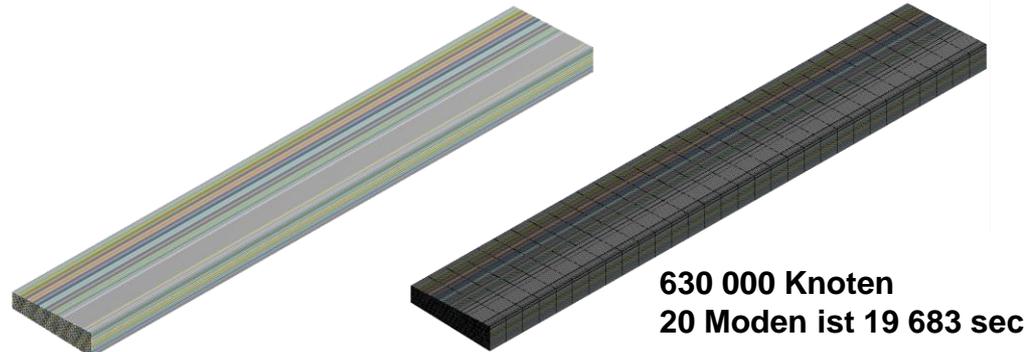
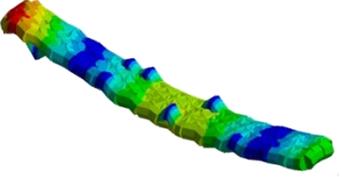
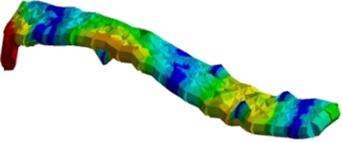
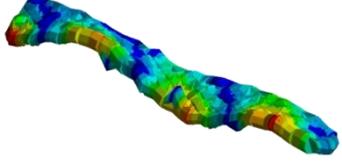
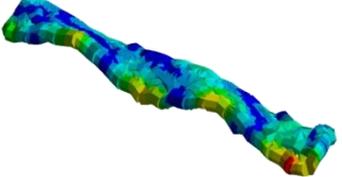
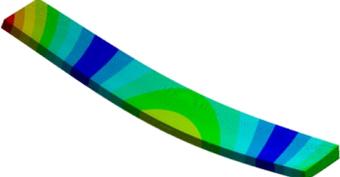
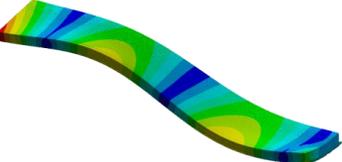
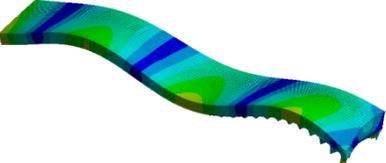
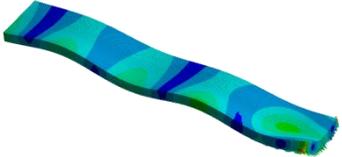


Abb. 9: Modellansicht des Probekörpers aus ANSYS.

## Ergebnisse:

	1. Mode	2. Mode	3. Mode	4. Mode
Modale Schwingform				
Eigenfrequenz	780 Hz	2127 Hz	4027 Hz	5706 Hz

# BEWERTUNG DES DETAILLIERTEN MODELLS.

		1. Mode	2. Mode	3. Mode	4. Mode
Messung	Modale Schwingform				
	Eigenfrequenz	745 Hz	1977 Hz	3481 Hz	5055 Hz
Simulation	Modale Schwingform				
	Eigenfrequenz	780 Hz	2127 Hz	4027 Hz	5706 Hz
Vergleich	MAC	0,612	0,709	0,630	0,433
	EF-Error	4,70 %	7,59 %	15,7 %	12,9 %

# ERSATZMODELL NACH CHAMIS.

## Materialdaten:

Transversal isotrope Ersatzmaterialdaten für Faserverbundmaterialien können mit den Formeln von Chamis auf Basis der Materialdaten der Grundwerkstoffe berechnet werden.

$$E_{11} = V^f E_{11}^f + V^m E^m$$

$$E_{22} = \frac{E^m}{1 - \sqrt{V^f} (1 - E^m / E_{22}^f)}$$

$$\nu_{12} = V^f \nu_{12}^f + V^m \nu^m$$

$$G_{12} = \frac{G^m}{1 - \sqrt{V^f} (1 - G^m / G_{12}^f)}$$

$$G_{23} = \frac{G^m}{1 - \sqrt{V^f} (1 - G^m / G_{23}^f)}$$

Abb. 10: Formeln von Chamis für transversal isotrope Materialdaten.

## Simulationsmodell:

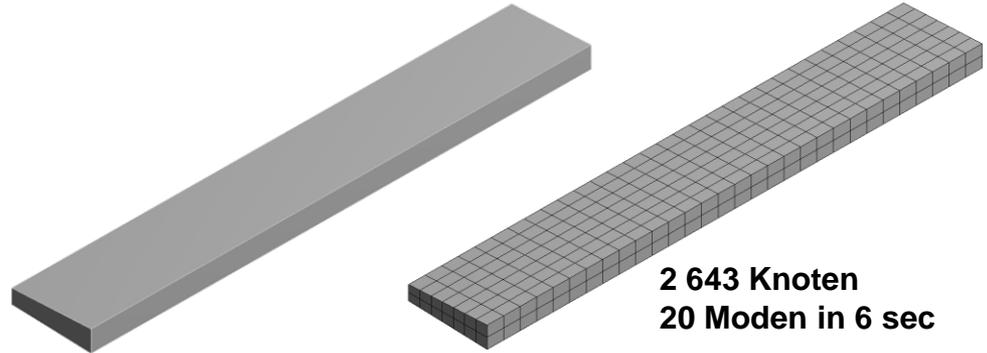
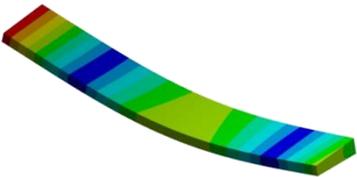
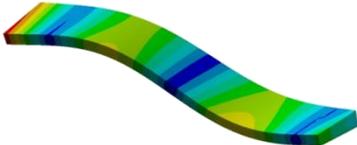
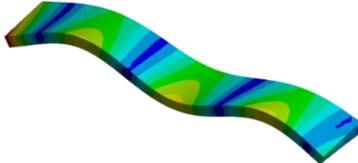
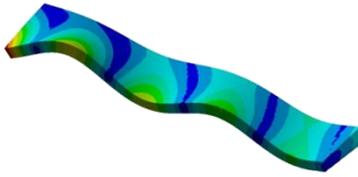
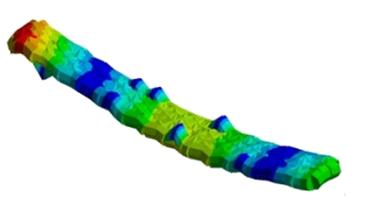
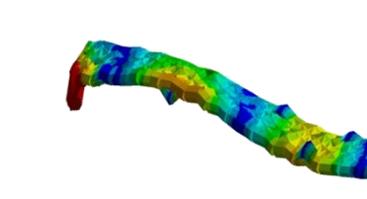
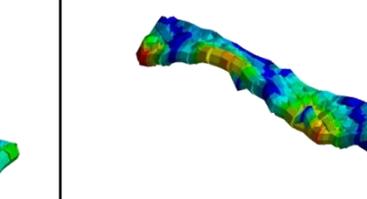
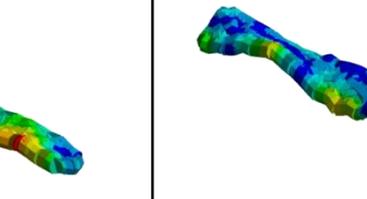
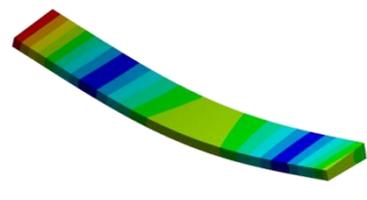
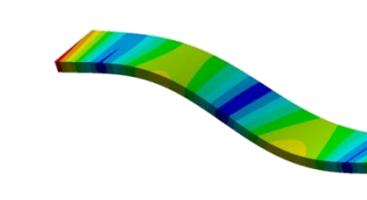
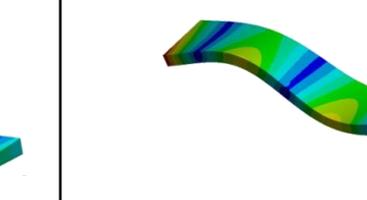
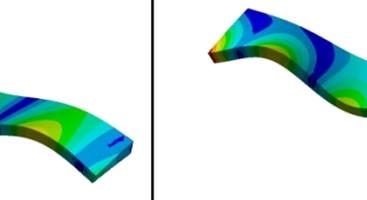


Abb. 11: Ansicht des transversal isotropen Ersatzmodells aus ANSYS.

## Ergebnisse:

	1. Mode	2. Mode	3. Mode	4. Mode
Modale Schwingform				
Eigenfrequenz	837 Hz	2240 Hz	4133 Hz	5873 Hz

# BEWERTUNG DES ERSATZMODELL NACH CHAMIS

		1. Mode	2. Mode	3. Mode	4. Mode
Messung	Modale Schwingform				
	Eigenfrequenz	745 Hz	1977 Hz	3481 Hz	5055 Hz
Simulation	Modale Schwingform				
	Eigenfrequenz	837 Hz	2240 Hz	4133 Hz	5873 Hz
Vergleich	MAC	0,941	0,554	0,679	0,281
	EF-Error	12,3 %	13,3 %	18,7 %	16,2 %

# MODEL UPDATING PROZESS.

## Prozessschaubild:

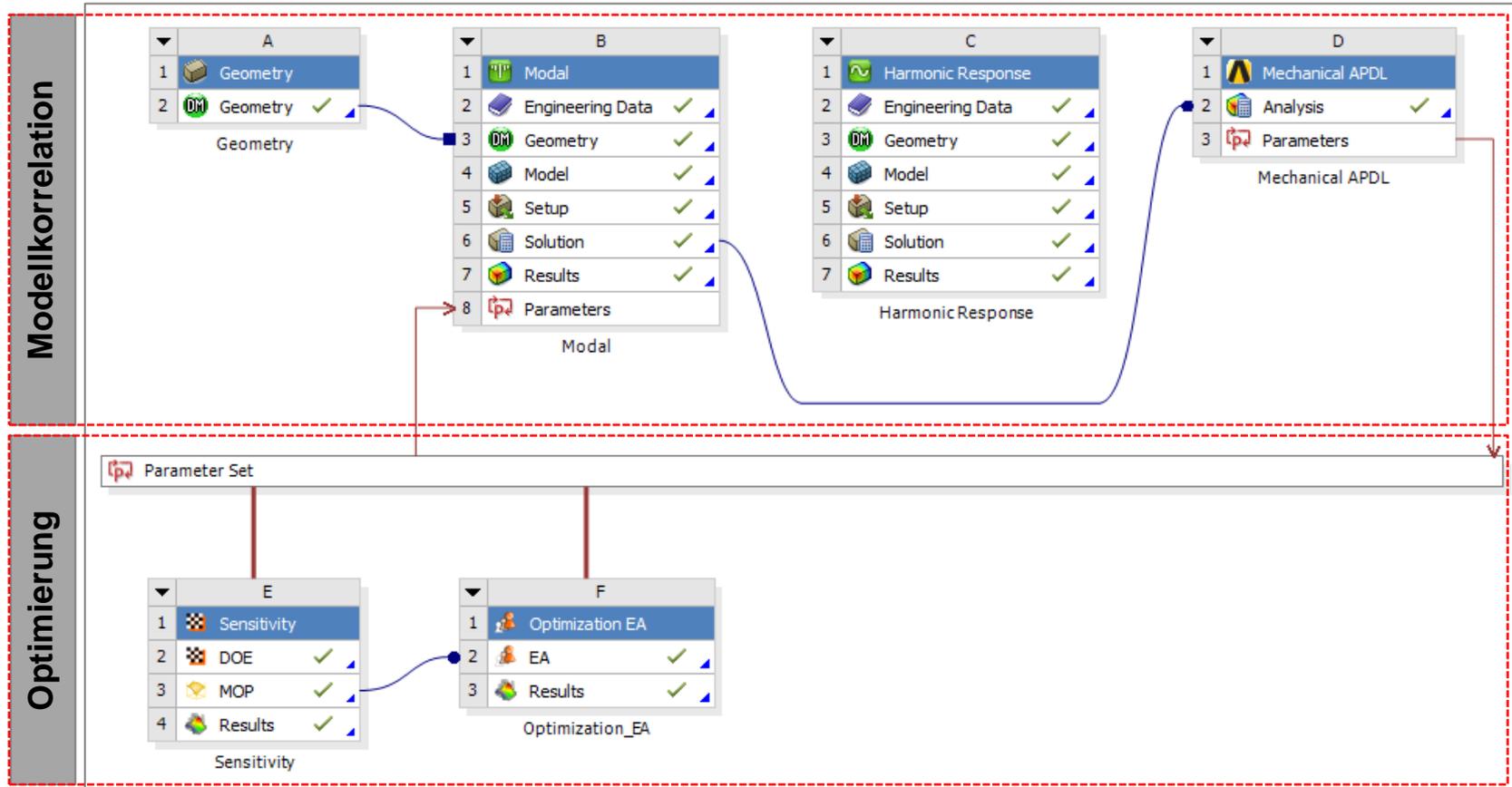


Abb. 12: Exemplarischer Screenshot der ANSYS WB Oberfläche für den dargestellten „Model Updating“ Prozess.

# MATERIALEIGENSCHAFTEN VIA MODEL UPDATING.

## Materialdaten:

Zwei von fünf Materialparametern wurden in einer Sensitivitätsanalyse als signifikant identifiziert und werden in einem „Evolutionary Algorithm“ hinsichtlich der Zielfunktion optimiert.

## Ergebnisse:

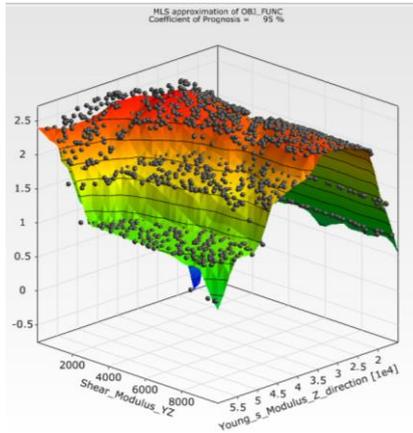


Abb. 13: Antwortfläche für die Eingangsmaterialparameter  $E_z$  und  $G_{xy}$

## Simulationsmodell:

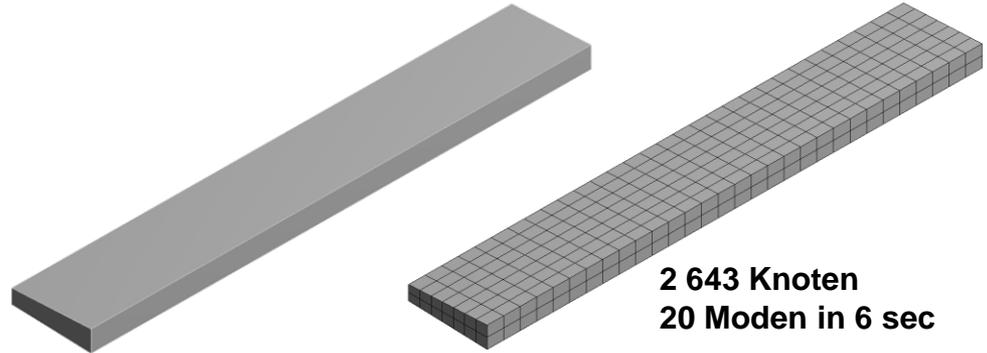
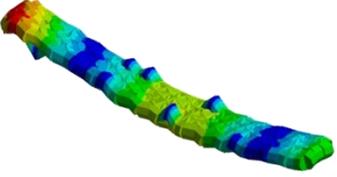
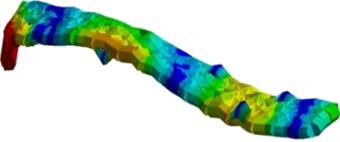
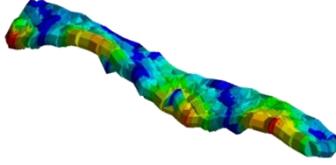
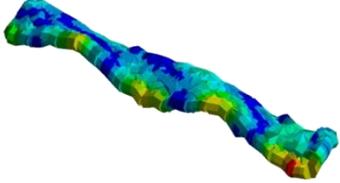
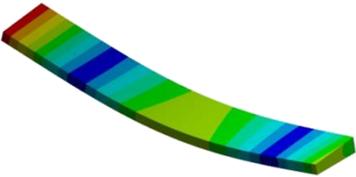
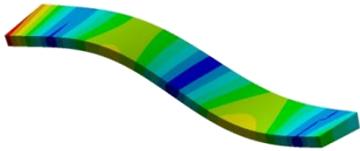
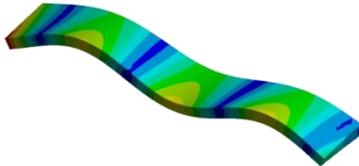
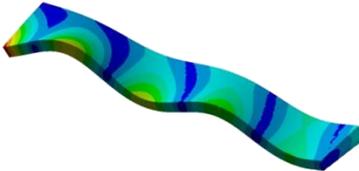


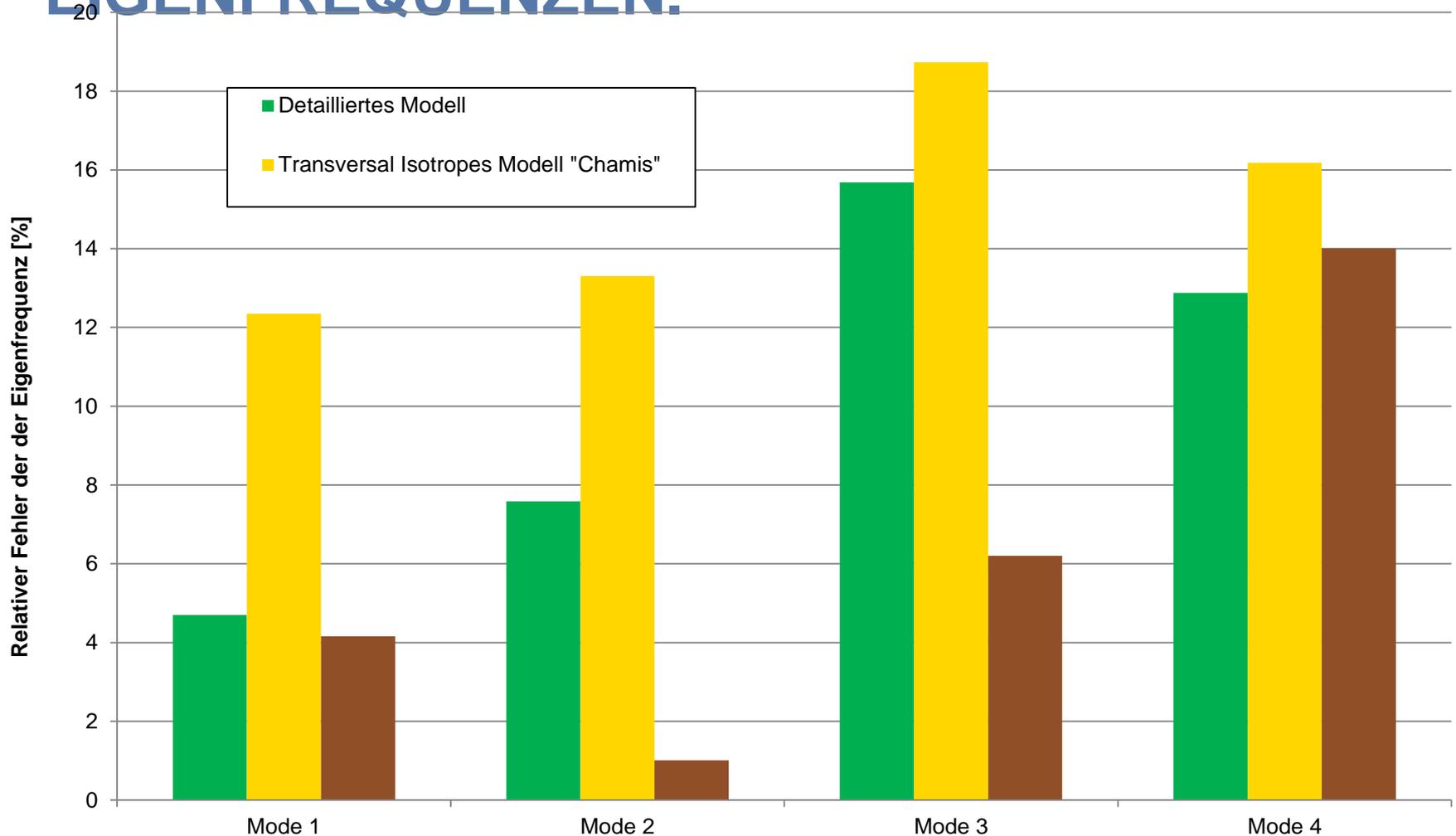
Abb. 14: Ansicht des transversal isotropen Ersatzmodells aus ANSYS.

	1. Mode	2. Mode	3. Mode	4. Mode
Modale Schwingform				
Eigenfrequenz	774 Hz	1957 Hz	3697 Hz	5763 Hz

# BEWERTUNG DES OPTIMIERTEN MODELLS.

		1. Mode	2. Mode	3. Mode	4. Mode
Messung	Modale Schwingform				
	Eigenfrequenz	745 Hz	1977 Hz	3481 Hz	5055 Hz
Simulation	Modale Schwingform				
	Eigenfrequenz	774 Hz	1957 Hz	3697 Hz	5763 Hz
Vergleich	MAC	0,944	0,677	0,678	0,567
	EF-Error	4,16 %	-1,01 %	6,21 %	14,0 %

# VERGLEICH DES REALATIVEN FEHLERS DER NUMERISCH BESTIMMTEN EIGENFREQUENZEN.



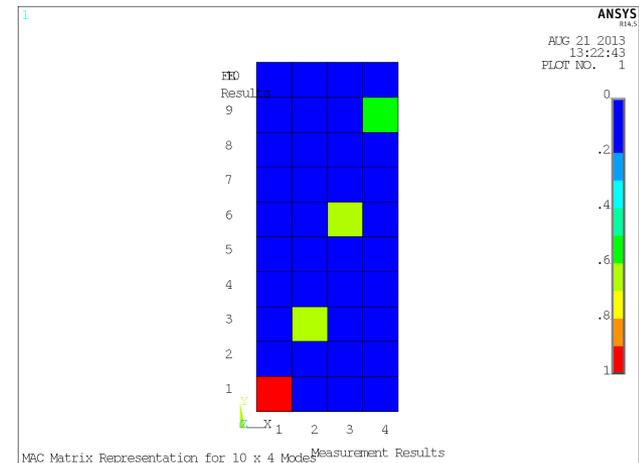
# VERGLEICH DER MAC-WERTE DER NUMERISCH BESTIMMTEN MODEN IN REFERENZ ZUR MESSUNG.



# FAZIT UND AUSBLICK.

	Voraussetzungen	Genauigkeit	Rechenaufwand
<b>Detailliertes Modell</b>	Materialdaten der Einzelkomponenten	+	--
<b>Ersatzmodell Chamis</b>	Materialdaten der Einzelkomponenten	+	+
<b>Model Updating</b>	Ergebnisse der Experimentelle Modalanalyse	++	+

- Model Updating Prozess in Ansys ist vollständig **automatisierbar**.
- Durch Verwendung des reduzierten Simulationsmodell kann **Berechnungsaufwand um Faktor 3000 gesenkt** werden.
- Numerische Modalanalyse liefert mehr Moden als die experimentelle Modalanalyse (siehe Abb.15) → Verbesserung der Messung notwendig.
- Die Quantifizierung von nicht-signifikanten Materialparametern (z.B. E-Modul in Gegenfaserrichtung) via „Model Updating“ ist nicht eindeutig möglich.



**Abb. 15: Darstellung der MAC-Matrix für das „optimierte Simulationsmodell“**

**VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT.**